VISIT…

LANZAROTE
Caliente.com

8 коп.

17

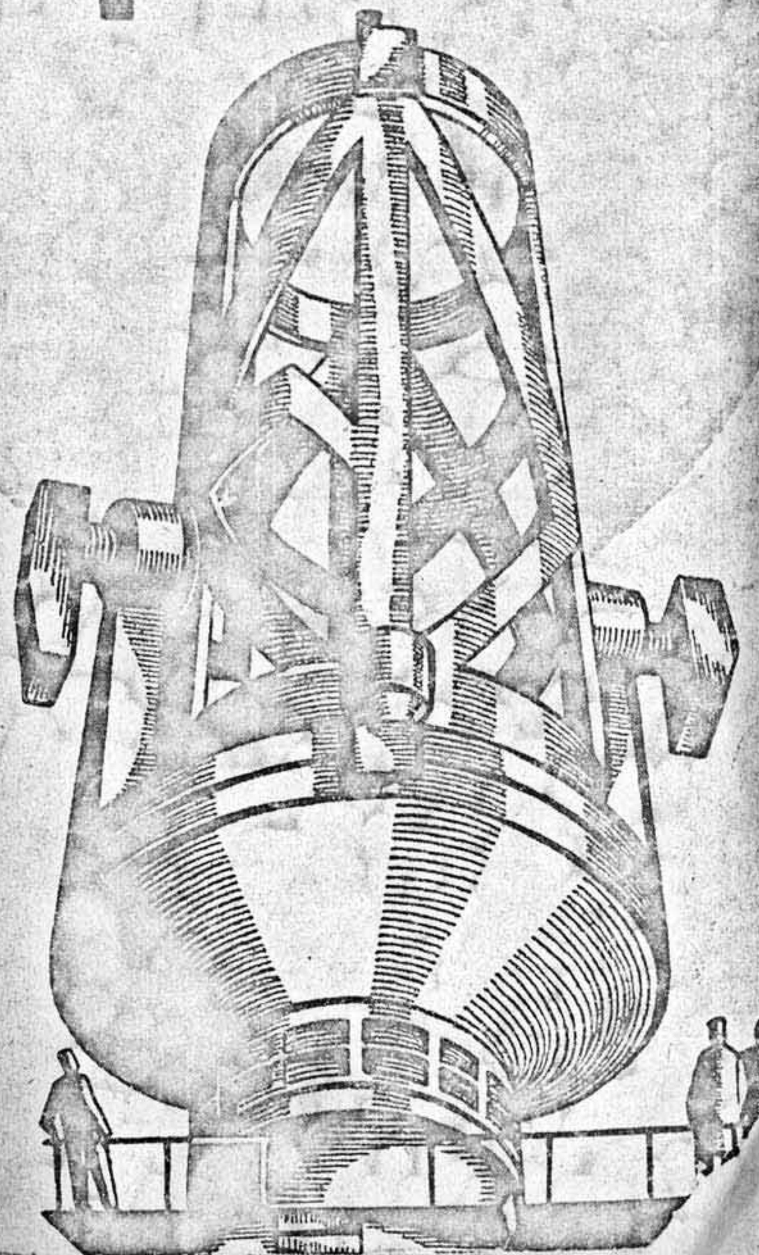
IX СЕРИЯ ФИЗИКА ХИМИЯ 1962



22.6
К

И. И. КУЧЕРОВ

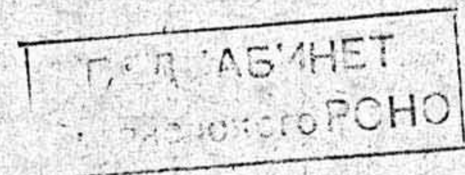
астроклимат



22.6
К

Кандидат
физико-математических наук
Н. И. КУЧЕРОВ

АСТРОКЛИМАТ



ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЗНАНИЕ»
Всесоюзного общества по распространению
политических и научных знаний
Москва 1962

ОТ АВТОРА

В настоящее время, когда ведется интенсивное изучение космического пространства при помощи ракет и космических кораблей, астрономия вступает в фазу бурного развития.

В ближайшие годы в различных областях и республиках нашей страны будут строиться новые астрономические обсерватории с большими астрономическими инструментами. Потребуется выбрать местности с благоприятными условиями для астрономических наблюдений, или, как говорят астрономы, с благоприятным астроклиматом. Но астроклимат нужен не только астрономам. Он представляет также интерес для геофизиков и радиофизиков.

Кроме того, в ближайшие годы надо ожидать развития и значительного расширения любительской астрономии, так как наша оптическая промышленность все в большем количестве выпускает небольшие, доступные по цене астрономические трубы. В школах возникают астрономические кружки, которые прививают учащимся любовь к астрономическим наблюдениям.

Знакомству со звездным небом хорошо способствуют и астроклиматические наблюдения. Поэтому их можно рекомендовать наравне с другими доступными любителям астрономическими наблюдениями, как, например, наблюдениями переменных звезд, падающих звезд, зодиакального света и т. п.

Систематические астроклиматические наблюдения, проведенные любителями, могли бы принести огромную пользу в изучении астроклимата отдельных районов нашей необъятной Родины. Конечной целью этой работы должно быть получение астроклиматической карты СССР.

Эта небольшая книга и призвана помочь тем, кто заинтересуется астроклиматом и собирается его исследовать. Она в первую очередь предназначена широкому кругу любителей астрономии, школьникам старших классов, преподавателям астрономии, а также всем начинающим наблюдателям, так как ясного представления о том круге вопросов, который охватывает понятие «астроклимат» и какое значение имеет его изучение, нет даже у многих специалистов — астрономов и геофизиков.

Атмосфера Земли и ее свойства

Огромный океан воздуха — земная атмосфера простирается над нами. На дне этого океана существует многообразная жизнь, обитает человечество. В атмосфере происходят постоянные изменения, движения воздуха, его замутнение и т. п. Атмосфера окутывает земной шар прозрачным слоем, сквозь который доходят до нас лучи Солнца, Луны и звезд и через который мы можем созерцать Вселенную.

Атмосфера имеет значительную массу. Полный вес атмосферы составляет примерно $5 \cdot 10^{15}$ *т*, так что на каждого человека приходится около 2 млн. *т* воздуха. Конечно, вес атмосферы по сравнению с весом земного шара $6 \cdot 10^{21}$ *т* ничтожно мал. Если бы можно было сжать атмосферу до плотности воды, то получился бы равномерный слой вокруг земного шара толщиной в 10 *м*. Обладая значительной плотностью, атмосфера предохраняет жизнь на Земле от губительного влияния космоса.

Атмосфера, подобно щиту, защищает Землю от метеоров и первичных частиц космических лучей, а также от рентгеновского излучения, так как им нелегко преодолеть столь серьезное препятствие. Без атмосферы Земля замерзла бы, и жизнь на ней погибла. Кроме того, опасные для жизни короткие ультрафиолетовые и рентгеновские лучи могли бы погубить живые организмы, и Земля стала бы бесплодной.

Наружная, внешняя поверхность атмосферы — сферическая, так как воздух, подобно воде, стремится образовать уровень, все точки которого находятся на одинаковом расстоянии от центра. Хаотические температурные движения молекул воздуха препятствуют сжатию атмосферы в тонкий плотный слой под действием силы тяжести.

С высотой плотность воздуха непрерывно уменьшается, и постепенно атмосфера переходит в космическое пространство, в межпланетный газ. Таким образом, точную границу атмосферы определить невозможно.

Центробежная сила, возникающая вследствие вращения Земли, пропорциональна квадрату скорости этого вращения. Все частицы атмосферы участвуют во вращательном движении земного шара. С увеличением расстояния сила притяжения Земли быстро убывает и на расстоянии 17 земных радиусов становится равной центробежной силе. Следовательно, на таком расстоянии частицы воздуха, если бы они там оказались, ушли бы в космическое пространство.

Основная масса атмосферы (около $^9/_{10}$ ее) заключена в нижнем слое, простирающемся до 16 *км*. С высотой количество воздуха быстро уменьшается, так, в слоях выше 100 *км* заключена одна миллионная часть всей массы атмосферы.

Нижняя часть атмосферы до высоты 10—11 *км* в полярных и умеренных широтах и до 15—17 *км* в тропических называется тропосферой. Она отделяется тонким слоем — тропопаузой от холодной стратосферы, простирающейся до 40 *км*. Затем ее сменяет мезосфера.

Слой атмосферы, расположенный между высотами 80—900 *км*, носит название термосферы. Эту область атмосферы чаще называют ионосферой. Еще выше простирается область экзосферы, которая переходит постепенно в космическое пространство, межпланетную среду (рис. 1).

Много различных факторов влияет на свойства атмосферы. К ним должны быть отнесены время дня и время года, широта места, географический ландшафт, процессы на Солнце.

Разделение атмосферы на ряд концентрических слоев основано на разнице в физических характеристиках этих слоев и прежде всего на изменении температуры.

В тропосфере температура непрерывно понижается с увеличением высоты. В наиболее низких слоях тропосферы благодаря сильному падению температуры по мере поднятия вверх возникает конвективная неустойчивость: холодный воздух наверху слоя оказывается слишком плотным по сравнению с теплым воздухом у поверхности Земли. В силу этого возникают вертикальные движения. Поэтому воздух в тропосфере находится в непрерывном движении как по вертикали, так и по горизонтали. Здесь образуются восходящие и нисходящие токи, зарождаются и разрушаются гигантские вихри (циклоны и антициклоны), происходит постоянное перемещение разнородных воздушных масс.

В холодной стратосфере температуры почти постоянны. Сравнительно теплая мезосфера имеет разные температуры, а в термосфере температура непрерывно и быстро растет с высотой.

Воздушный океан Земли находится в состоянии непрерывного теплового обмена с твердой и жидкой оболочками Земли и с биосферой. Во всей толще атмосферы происходит радиационный обмен с космосом и с поверхностью Земли.

2459—2

Распределение температуры в нижних слоях тропосферы определяет собой основные стороны характера климата земного шара. В средних широтах температура значительно изменяется по временам года. Наиболее заметно это происходит над континентами и ото дня ко дню. Причиной этого служит перемещение воздушных масс крупного масштаба, зародившихся либо в полярных, либо в тропических районах, либо над океанами, а также изменения облачности и солнечной радиации.

В атмосфере всегда происходит конденсация водяного пара, благодаря чему образуются облака, выпадают осадки. Конденсации способствуют восходящие потоки воздуха. В нижней тропосфере конденсация происходит значительно интенсивнее, нежели в верхних ее слоях, где возникают благодаря этому тонкие перистые облака, состоящие из ледяных кристалликов. В процессе конденсации выделяется значительное скрытое тепло, получаемое у земной поверхности при испарении. Это тепло является одной из важных причин движения воздуха. В стратосфере и термосфере конденсация водяного пара почти не наблюдается, за исключением редких случаев появления «перламутровых» облаков на высоте около 30 *км* и «серебристых» облаков на высоте 80 *км*.

Нагревание воздуха происходит в основном за счет получения тепла от земной поверхности, а не от солнечных лучей, так как атмосфера очень мало поглощает солнечной энергии, всего лишь около 17%, тогда как около 40% поглощается земной поверхностью, а остальные 43% отражаются обратно в космическое пространство.

Тепло, полученное в одном месте, может быть передано в другие места разными способами: посредством теплопроводности, излучения, турбулентности, конвекции и адвекции. Эти понятия поясняются ниже. Перенос тепла посредством теплопроводности и излучения чрезвычайно мал, и эти способы можно не рассматривать. Основной перенос тепла в атмосфере происходит за счет турбулентности, конвекции и адвекции.

Турбулентностью называется неупорядоченное движение отдельных мелких объектов воздуха, образующее небольшие вихри внутри общего течения воздуха. Благодаря легкой подвижности воздуха возникает турбулентность. Турбулентные вихри переносят с собой тепло, влагу и пыль. Вследствие турбулентности тепло, поглощенное земной поверхностью, передается в воздухе и поднимается вверх.

Днем при нагревании лучами Солнца земной поверхности прилегающие слои воздуха также начинают нагреваться и подниматься вверх, в то время как холодный воздух устремляется вниз.

Следует иметь в виду, что земная поверхность нагревается солнечными лучами в области спектра от ближайших ультра-

фиолетовых лучей до ближайших инфракрасных лучей, перерабатывает это излучение в более длинноволновое, которое и задерживается атмосферой. На внешнюю же поверхность ат-

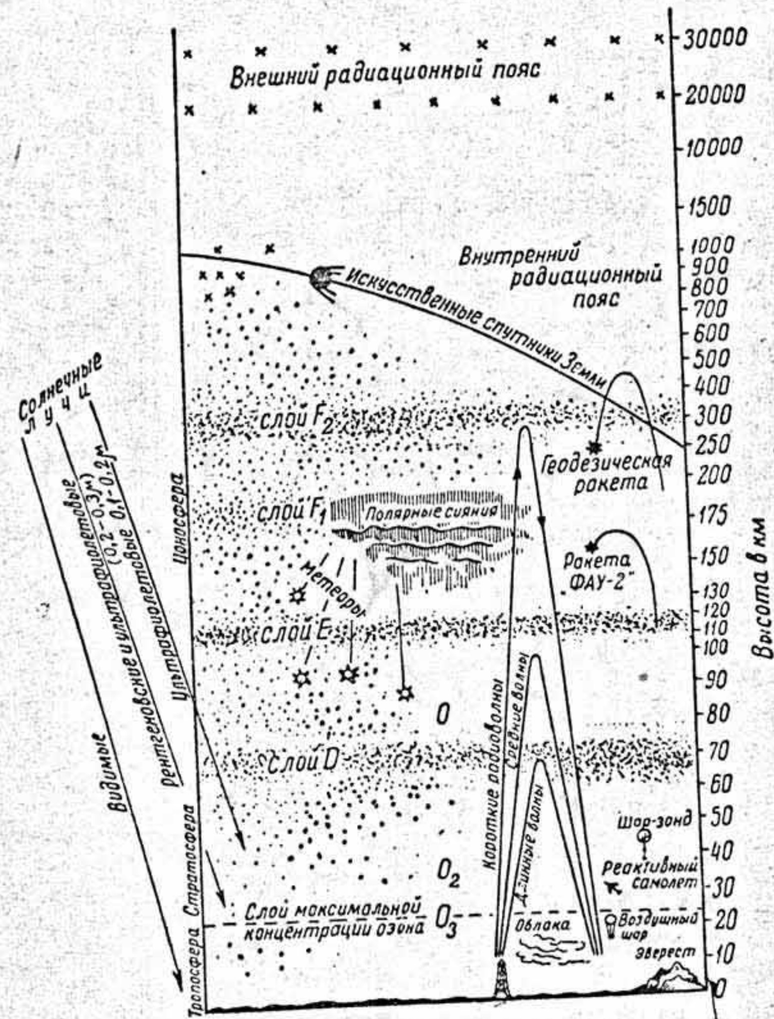


Рис. 1. Вертикальный разрез атмосферы.

мосферы падает излучение всего диапазона электромагнитного спектра от самых коротких гамма-лучей до самых длинных радиолучей и даже шире. Энергия этого облучения составляет 2 калории в минуту на квадратный сантиметр площади, перпендикулярный к падающим лучам.

Конвекцией называется перенос воздуха в вертикальном

направлении. Скорость такого потока воздуха вверх иногда достигает 10 *м* в секунду.

Адвекцией называется перенос тепла воздушными течениями большого масштаба. Такие течения происходят главным образом в горизонтальном направлении, и поэтому адвективный перенос тепла в основном горизонтален. В то время как турбуленция и радиационный перенос тепла сглаживают температурные контрасты, адвективный перенос может и создавать и разрушать их в зависимости от разных условий.

Вертикальные перемещения воздуха и теплообмен происходят и днем и ночью. Днем тепловой поток чаще всего направлен вверх. Ночью тепло передается вниз, к поверхности Земли.

Нормальное распределение температур по вертикали иногда нарушается, при этом возникают инверсии температуры.

Так называют явление, когда температура воздуха с высотой растет, а не понижается, как обычно. Большей частью инверсии имеют радиационное происхождение, связаны с процессами излучения и с поглощением лучистой энергии. В тропосфере, в ее наиболее нижних, самых приземных слоях вследствие излучения земной поверхности возникают инверсии температуры. Они наблюдаются в любое время года, но в теплое время года образуются лишь в ясные, тихие ночи, когда поверхность Земли интенсивно излучает и при этом выхолаживаются самые нижние слои воздуха.

Протяженность по высоте такого инверсионного слоя составляет всего несколько десятков и редко сотен метров. Утром с восходом солнца такая инверсия быстро прекращается. В холодное время года инверсия в приземных слоях возникает не только ночью, но и днем. Происходит это потому, что при низком положении солнца на небе количество тепла, получаемого от него, оказывается иногда меньшим, чем потеря тепла земной поверхности благодаря излучению. Поэтому поверхность Земли при снежном покрове гораздо сильнее охлаждается, и вследствие этого прилегающие слои воздуха также выхолаживаются.

Температурные инверсии имеют место в различных слоях атмосферы.

Кроме чрезвычайно большой подвижности, воздух еще и легко сжимаем. 1 $м^3$ воздуха, взятый у земной поверхности, весит около 1,3 *кг*. Благодаря этому атмосфера оказывает на поверхность Земли давление, составляющее 10 333 *кг* на квадратный метр. Это давление принимается за единицу измерения, называемую одной атмосферой.

Поскольку атмосферное давление равно весу воздушного столба, то с увеличением высоты оно должно постепенно уменьшаться. Так же будет меняться и плотность воздуха. Давление атмосферы вследствие разных условий изменяется

и в горизонтальном направлении, а такое изменение приводит к перемещению воздуха в горизонтальном направлении, т. е. к возникновению ветра. В отдельных областях тропосферы то возникают участки пониженного давления (циклоны), то, наоборот, повышенного давления (антициклоны).

Помимо обычных ветров, достигающих порой огромной силы, всегда в атмосфере наблюдаются короткие порывы или пульсации ветра.

Сравнительно недавно в верхних слоях тропосферы были открыты струйные течения. Это узкие потоки воздуха, перемещающиеся с огромной скоростью — от 30 до 55 *м* в секунду. Они дуют в основном с запада на восток на протяжении тысячи километров в длину, шириной в сотни километров и высотой в несколько километров. Максимальные скорости ветра в струйных течениях достигают 300—400 *км/час* над нашей территорией и Западной Европой и 750 *км/час* над Тихим океаном. Струйные течения надо рассматривать в связи с общей циркуляцией атмосферы, т. е. перемещением воздуха в крупном масштабе, захватывающем большие области. Можно предполагать, что струйные течения имеют место и в стратосфере, поскольку в нижней ее части они были недавно обнаружены.

В области струйных течений помимо горизонтального перемещения воздуха, достигающего порой нескольких сот метров в секунду, происходит и вертикальное движение со скоростью нескольких метров в секунду. Таким образом, в струйном течении движение воздуха носит турбулентный характер. Благодаря этому самолеты, даже такие большие, как ТУ-104, попадая в струйное течение, испытывают болтанку и проваливаются в воздушные ямы даже при отсутствии облаков.

Воздух атмосферы состоит из различных газов. В чистом сухом воздухе содержится около 78% (по объему) азота, 21% кислорода, приблизительно 1% аргона и около 0,03% углекислого газа. Соответственно по весу это составляет 0,76; 0,23; 0,012 и 0,0045 долей общего веса атмосферы.

Воздух содержит в себе также водяной пар, количество которого постоянно меняется. Количество водяного пара в атмосфере Земли зависит от температуры воздуха. Чем выше температура воздуха, тем большее количество водяного пара может в нем содержаться. Если при данной температуре количество пара достигает максимума, то воздух считается насыщенным и при охлаждении такого воздуха в нем происходит конденсация водяного пара в водяные капельки или при отрицательных температурах — в ледяные кристаллы.

В воздухе, кроме того, содержится некоторое количество «загрязняющих» примесей. К ним относятся: пыль, сажа, соли. Частицы, загрязняющие воздух, настолько мелки, что они не видимы глазом, но вызванное ими ухудшение прозрачности и изменение окраски отдаленных предметов хорошо заметны.

Астроклимат и его характеристика

Астрономы принуждены вести свои наблюдения через всю толщу воздушного океана, который находится в непрерывном движении и претерпевает постоянные изменения, создавая помехи, сильно мешающие этим наблюдениям.

Наблюдая небесные светила в телескоп, мы видим, что их изображения колеблются, как бы дрожат, размываются и меняют свою яркость. Если посмотреть на звезду с небольшим увеличением, то можно заметить лишь дрожание звезды и быстрое изменение ее блеска. При большем увеличении яркая звезда видна, как светлый центральный кружок, окруженный системой концентрических колец. Но такая картина будет наблюдаться только при условии спокойного состояния атмосферы. Часто кольца у изображения звезды кажутся разорванными, а порой просто перестают быть видимыми. Изображение, как говорят, размывается.

При наблюдении планет можно видеть, как диск планеты как бы переливается, меняя яркость отдельных частей. Край диска при этом как бы течет, струится. Изображение настолько нечеткое, что иногда бывает невозможно разобрать на диске какие-либо детали. То же может происходить при наблюдении Луны и Солнца.

Изменение прозрачности атмосферы в момент наблюдения может исказить правильную оценку окраски звезд, т. е. помешать определению звездной величины. Все указанные явления вызываются атмосферой и носят общее название атмосферных помех.

Итак, на астрономические наблюдения в большей степени влияет состояние атмосферы в том месте, где производятся наблюдения. Это состояние можно характеризовать такими явлениями, как дрожание, мерцание и размывание изображений звезд, видимых в телескопе. Все эти факты, влияющие на астрономические наблюдения, называют *астроклиматическими*, а в совокупности они составляют *астроклимат*.

К астроклимату можно отнести и некоторые метеорологические явления: прозрачность воздуха, облачность, ветер, суточную амплитуду температуры и влажность, в значительной степени влияющие на успешность астрономических наблюдений.

Каждое из перечисленных явлений в данном месте с течением времени может сильно меняться. Поэтому для оценки места в отношении условий для астрономических наблюдений необходимо знать, как изменялись эти явления в течение длительного периода времени. Иными словами, необходимо изучить астроклимат данного пункта.

Необходимо также знать, какое время наиболее благоприятно для наблюдений, когда атмосферные помехи будут наименьшими, а также величину помех. Тогда их можно учитывать при наблюдениях.

Важно выяснить, постоянен ли астроклимат данного места или он меняется и как быстро происходят его изменения.

Для успешного выполнения различных астрономических наблюдений требуются разные астроклиматические условия. Для астрометрических наблюдений важнейшую роль играет величина дрожания изображений звезд. Для решения задач звездной астрономии при фотографировании слабых звезд, Млечного Пути и туманностей наиболее существенны прозрачность воздуха и дрожание изображений звезд. Для наблюдений Солнца наибольшее значение имеют облачность, прозрачность и дрожание изображения Солнца. Наблюдения планет требуют, чтобы изображение в телескопе было неподвижно. Это бывает при отсутствии вертикальных токов в атмосфере и всякого рода завихрений в ней. Поэтому запыленный воздух часто бывает более спокойным, чем чистый, прозрачный. Следовательно, прозрачность атмосферы при наблюдении планет менее существенна, чем спокойствие и степень размытости дифракционного изображения звезд, т. е. светлой точки, окруженной системой светлых колец, отделенных друг от друга темными кольцами. Для электрофотометрических наблюдений большое значение имеет дрожание и особенно мерцание звезд. И, наконец, для спектральных наблюдений требуется, пожалуй, наибольшее число благоприятных астроклиматических характеристик: незначительная облачность, высокая прозрачность атмосферы, резкость дифракционных изображений, ничтожное дрожание и мерцание звезд.

Благодаря дрожанию весь свет от звезды полностью никогда не используется в щелевых спектрографах. Обычно спектрограф сочетают с телескопом, так что щель оказывается в фокальной плоскости объектива или зеркала. Мерцание и дрожание вносят искажение при некоторых спектрофотометрических измерениях, в частности при определении интенсивности линий на негативах, полученных призменными камерами (так называются астрографы с призмами перед объективом) и бесщелевыми спектрографами, в которых щели нет. В последних свет от слабого объекта, помещенного на оптической оси телескопа, направляется прямо на призму спектрографа. Вследствие дрожания края Солнца невозможно правильно отсчитывать при спектральных наблюдениях абсолютные высоты хромосферы и протуберанцев.

Изучение астроклимата и его отдельных элементов имеет значение не только для астрономических наблюдений, но и для физики атмосферы, метеорологии, радиофизики и др. Чрезвычайно важной задачей является нахождение зависимостей астроклиматических характеристик от метеорологических,

синоптических и географических условий. Но установление этих зависимостей — не простое дело и требует длительных и очень трудоемких астрономических и метеорологических наблюдений.

В атмосфере всегда происходит движение воздуха в виде больших ламинарных или слоистых потоков, в которых сохраняется упорядоченное движение частиц воздуха по параллельным друг к другу траекториям, и турбулентных течений, в которых частицы воздуха совершают хаотическое движение по весьма сложным траекториям. Отличие турбулентного течения от ламинарного, т. е. упорядоченного, заключается в том, что в каждой точке потока скорость изменяется со временем и имеет пульсационный характер. При этом возникают вертикальные токи, или струи, и вихри, движущиеся в самых различных направлениях. Благодаря этому смежные слои воздуха перемешиваются, вследствие чего создаются местные неоднородности.

Возникновение турбулентности воздуха происходит от неравномерности нагревания отдельных частей земной поверхности, сильных порывов ветра, от неровного рельефа местности и т. д. Характерным проявлением турбулентности является изменчивость силы и направления ветра.

Когда мы в степи в жаркий день смотрим вдаль, то все предметы, находящиеся далеко от нас, начинают как бы переливаться или струиться, и порой так сильно, что теряют свои обычные очертания. В миниатюре такое же явление наблюдается над горячей плитой. Происходит это вследствие искривления световых лучей в потоках теплого воздуха, который небольшими струями поднимается от нагретого тела. На высоте около 2 *м* нагретый воздух уже перемешивается с холодным, и вертикальные струи становятся меньше.

Ньютон в своей знаменитой «Оптике» писал: «Так воздух, сквозь который мы смотрим на звезды, пребывает в постоянном дрожании, как это видно из дрожащего движения теней от высоких башен и из мерцания неподвижных звезд».

Лучи света от небесных тел по мере проникновения их в земную атмосферу встречают на своем пути движущиеся неоднородности воздуха по плотности, влажности и температуре и, проходя через них, различным образом преломляются. Неоднородности более холодного и плотного воздуха действуют подобно собирающим линзам и дают искривления фронту плоской световой волны, обращенные вогнутой стороной к земной поверхности. Неоднородности более теплого и менее плотного воздуха дают выпуклые искривления.

На сравнительно небольшом участке поверхность световой волны можно рассматривать как плоскость. Лучи света, являющиеся нормалями к таким плоскостям, непрерывно меняют свое направление внутри малого конуса, и наблюдатель видит

в трубу волнующееся изображение звезды, которое при этом меняется по форме, положению, яркости и цвету.

Углом турбуленции называется наибольший угол между образующей и осью конуса, в пределах которого колеблется луч, идущий от светила. Осью конуса является первоначальное направление на звезду. Угол турбуленции зависит от амплитуды и длины волны деформированного волнового фронта (рис. 2). В каждой точке волновой поверхности, называемой обычно фронтом волны, можно провести перпендикуляр к этой поверхности, т. е. луч.

Величина угла турбуленции вполне определенно может характеризовать спокойствие атмосферы в данном направлении и в указанный момент.

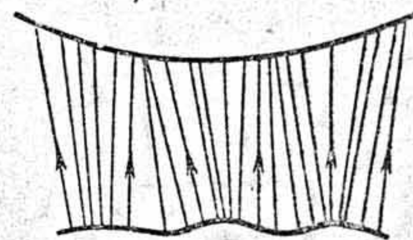


Рис. 2. Изменение хода лучей от искривления световой волны.

Кроме турбуленции, обусловленной быстро возникающими неоднородностями атмосферы, на качество астрономических изображений могут еще оказывать влияние и так называемые случайные рефракции, вызываемые прохождением в поле зрения телескопа более значительных масс воздуха, отличающихся от соседних оптическими характеристиками. В результате пересечения лучом таких неоднородностей будет наблюдаться значительно большее смещение изображений, чем вызываемое турбуленцией. Случайные рефракции вызывают более медленные смещения (несколько циклов в минуту) по сравнению с турбуленцией, которая обусловливает быстрое смещение (несколько десятков циклов или герц в секунду).

Безаберрационный объектив телескопа рисует идеальное дифракционное изображение звезды — так называемый «кружок Эри» в виде неподвижного маленького светлого кружка, окруженного большим числом светлых колец, быстро спадающей яркости. Подобная картина могла бы наблюдаться лишь за пределами атмосферы, например на искусственном спутнике Земли или на Луне.

При наблюдении же с поверхности Земли такой идеальной картины получить невозможно. Колебания воздуха, происходящие на всем протяжении луча, будут влиять на качество изображений звезд, нарушая и размывая дифракционную картину. При этом кольца могут разрываться либо исчезать совсем, а затем снова появляться; яркость их будет изменяться, центральный светлый кружок может искажаться, принимая причудливые формы. Иногда при очень плохих изображениях

вместо кружка и колец наблюдатель будет видеть просто диск, напоминающий планету. К этому надо добавить еще колебание самого изображения.

Это сложное явление и определяет собой то, что называется качеством астрономических изображений. Каждое из составляющих его простых явлений носит особое название. Так, мгновенное изменение яркости изображения звезды называется *мерцанием,* мгновенное изменение цвета изображения звезды называется *хроматическим мерцанием*, изменение формы изображения звезды носит название *пульсации* и наконец изменение положения звезды называется *дрожанием.*

Как уже было сказано, порчу изображений вызывают две причины: турбуленция и перемещение значительных масс воздуха. Следовательно, качество астрономических изображений зависит от двух причин: угла турбуленции и угла случайной рефракции. Очевидно, что качество изображений меняется случайным образом ото дня ко дню. Определение качества изображений из длительного ряда наблюдений — одна из важнейших задач при изучении астроклимата.

Имеются различные возможности характеризовать и оценивать качество астрономических изображений. Приведем некоторые из них.

Например, при разном состоянии атмосферы некоторые двойные звезды будут либо разлагаться, либо не разлагаться на составляющие их компоненты. Подобрав звезды различной степени близости, можно характеризовать состояние атмосферы в данном направлении оценками: «отлично», «хорошо», «удовлетворительно» и «плохо».

Можно оценивать качество изображений и по наблюдениям Солнца, Луны, планет, беря критерием оценки либо резкость их края, либо видимость отдельных деталей. Но не все эти способы определения качества изображений одинаково хороши и удобны, так как большинство из них описывает только одну из сторон явления и совсем не затрагивает других.

Наиболее объективным и распространенным методом определения качества изображения звезд служит способ оценки дифракционной картины, получаемой от звезды при помощи астрономической трубы с большим увеличением, не ниже разрешающего.

Поскольку понятие «качество изображения» охватывает широкий комплекс разнообразных явлений, зависящих от состояния воздуха на всем пути луча (в английской и американской литературе аналогичным понятием является Seeing), то для характеристики самой дифракционной картины и размывания лучше применить термин «степень размытости».

Таким образом, *степенью размытости* дифракционного изображения называют отклонение наблюдаемого изображения от идеального.

Итак, качество астрономических изображений характеризует комплекс следующих явлений:

1) размывание изображений звезд, включая и пульсацию;
2) дрожание изображений звезд;
3) мерцание изображений звезд, включая и хроматическое мерцание.

Турбуленция вызывает размывание изображений, зависящее от амплитуды и длины деформируемой световой волны и от относительных размеров отверстия объектива. При больших амплитудах, но при длинной волне малый объектив может вырезать из волнового фронта достаточно малый участок, на протяжении которого волновые аберрации, т. е. отклонения реальной волновой поверхности от сферической, будут весьма незначительными, несмотря на большую амплитуду. Благодаря этому степень размытости изображения может быть очень малой и даже неощутимой для глаза.

Но стоит только увеличить диаметр объектива так, чтобы он захватывал значительную часть волнового фронта, как степень размытости резко увеличивается.

Все это относится к неподвижным или перемещающимся достаточно медленно изображениям, за которыми глаз или приемник способен вовремя уследить.

Дрожание изображений обусловлено той же турбуленцией. Если объектив достаточно мал по сравнению с длиной волны деформированного волнового фронта, то мы наблюдаем перемещение почти не размытого дифракционного изображения звезды в пределах конуса, внутри которого колеблется луч, идущий от светила. Для краткости будем называть этот конус — конусом турбулентности.

Если же отверстие одного порядка с длиной волны или, тем более, его превышает, то изображение звезды заполняет весь конус турбуленции и воспринимается глазом как бурлящее или планетарное изображение, в котором распределение энергии меняется. В этом случае трудно говорить о дрожании звезды, а можно лишь говорить о бурлении отдельных точек ее изображения, или пульсации.

Дрожание изображения звезды зависит от угла турбуленции и практически не зависит от расстояния до турбулентного слоя. На степень размытости дифракционного изображения дрожание может влиять следующим образом: если частота дрожания такова, что за ней из-за большой инерции не успевает уследить приемник, то дрожания суммируются и приводят к расплывчатому изображению, заполняющему конус турбуленции.

Инерция глаза соответствует 30—50 циклам в секунду или 30—50 герц, и поэтому мы не замечаем отдельных кинокадров фильмов, проскакивающих с этой частотой. Если же приемник

(глаз, телескоп, кинокамера и т. п.) успевает уследить за частотой дрожания, то в отдельные моменты мы будем получать различную степень размытости изображений и, отбрасывая плохие, использовать хорошие (например, при наблюдениях планет, Солнца и Луны). В этом смысле быстрые периодические дрожания звезд вреднее медленных.

Величину дрожания звезд впервые определил Ньютон, и им было показано, что с увеличением отверстия объектива дрожание звезд уменьшается. Объяснил он это тем, что лучи света, отклонившись в одной части большого объектива, захватываются в другой его части. Невооруженный глаз, имеющий «разрешающую силу» (т. е. возможность увидеть два близких предмета раздельно) ночью в случае наблюдения звезд около 1 минуты дуги, не замечает дрожания звезды потому, что величина его амплитуды никогда не превышает нескольких секунд дуги.

Вследствие постоянного изменения волнового фронта световые лучи непрерывно отклоняются и в наш глаз поступает то больше, то меньше света, что воспринимается нами как изменение яркости или мерцание звезды. При наблюдении мерцания звезды в телескоп освещение объектива все время меняется, испытывая то усиление, то ослабление, благодаря чему и происходит изменение яркости звездного изображения.

Мерцание звезд заметно увеличивается по мере приближения их к горизонту. Происходит это вследствие прохождения лучей через большую толщу атмосферы, и поэтому они испытывают больше отклонений.

Меньше всего мерцание заметно у зенита: так, при спокойной атмосфере можно лишь изредка заметить мерцание ярких звезд. Никогда не замечается изменений в свете звезд, находящихся на высоте больше 50°, однако звезды, расположенные ниже 35°, часто изменяют свой блеск. Великолепное зрелище представляют в зимние ночи красивые созвездия Ориона и ближайшей звезды Сириуса. Яркие звезды Ориона вместе с Сириусом переливаются всеми цветами радуги. И чем сильнее мороз, тем сильнее они мерцают.

Понаблюдайте за мерцающей яркой звездой через запотевшее оконное стекло, и вы увидите, что поверхность стекла освещена по-разному, но яркость меняется одновременно по всей освещенной поверхности. Происходит это вследствие того, что человеческий глаз более чувствителен к изменениям освещенности поверхности, чем к изменениям яркости светящейся точки. Планеты мерцают гораздо меньше, чем звезды.

Объясняется это тем, что у звезд, даже в самые большие телескопы, мы не можем различить диски, и все звезды кажутся нам точками, тогда как планеты имеют видимые диаметры от 10 до 68″ у Венеры и от 36 до 51″ у Юпитера. Так как воздушные массы отклоняют луч света всего лишь на несколько

секунд дуги, то лучи, сначала попавшие в наш глаз, будут заменены другими лучами из того же светового потока, почти неизменного. Заметить мерцание планеты можно тогда, когда изменение в направлении ее лучей будет близко к величине ее видимого диаметра. Поэтому Венера и Меркурий, иногда имеющие форму узкого серпа, в это время заметно мерцают. Огни, находящиеся в нескольких километрах от нас, кажутся мигающими, т. е. мерцающими. На корабле в море также можно наблюдать мерцание далеких огней на берегу или на встречных судах.

Мерцание зависит от отверстия телескопа, угла турбуленции и от расстояния до турбулентного слоя. Чем меньше диаметр объектива, тем сильнее будет мерцание звезд.

На рис. 2 изображен ход лучей, соответствующий волновому фронту звезды. Как видно, лучи в отдельных местах то собираются, то расходятся, и, помещая глаз в одно из этих мест, мы будем воспринимать непрерывное изменение яркости звезды. В этом и заключается причина мерцания.

Необходимо отметить, что в действительности явление усложняется еще ролью дифракции, которую мы видим, например, сквозь ресницы при почти сдвинутых веках.

В атмосфере, особенно в ее плотных слоях у горизонта, происходит, кроме того, и дисперсия света, т. е. разложение белого света на цветные, так называемые монохроматические лучи. Эти цветные лучи в различных комбинациях, сочетаясь друг с другом, окрашивают звезду для глаз наблюдателя в различные цвета, все время переливающиеся, сменяющие друг друга. В этом и состоит явление хроматического мерцания. В литературе по этому вопросу некоторые авторы под мерцанием понимают и дрожание, что принципиально неверно, так как при дрожании звезда меняет свое положение, не изменяя своей яркости и цвета, тогда как при мерцании яркость звезды непрерывно изменяется, а ее местонахождение на небе сохраняется неизменным.

Существует много всяких способов наблюдения перечисленных нами астроклиматических характеристик, каждая из которых изучается своим особым методом. Назовем наиболее распространенные в настоящее время способы наблюдений.

Для исследования размывания дифракционных изображений звезд существует достаточно удобный визуальный метод Данжона—Кудера, состоящий в оценке дифракционной картины при помощи астрономического инструмента с диаметром объектива не меньше 100 *мм*, хорошего оптического качества, с увеличением не ниже разрежающего.

В этом методе дается зависимость между углом турбуленции и степенью размытости, причем в эту зависимость входит угловая величина дифракционного кружка $a = \frac{139'',6}{Д}$,

где *Д* — диаметр объектива, выраженный в миллиметрах. Оценивать величину угла турбуленции на любом зенитном расстоянии можно, пользуясь следующей шкалой:

1 балл	$t''_z < \frac{1}{4} a$	Полное и совершенно спокойное дифракционное изображение.
2 балла	$t''_z = \frac{1}{4} a$	Целые дифракционные кольца с пробегающим по ним световым бликом. Ровный, спокойный дифракционный кружок.
3 балла	$t''_z \; \frac{1}{2} a$	Волнующееся изображение. Кольца разорваны. Пульсация дифракционного кружка.
4 балла	$t''_z = a$	Мелькают иногда отдельные дуги дифракционных колец. Сильно пульсирует дифракционный кружок.
5 баллов	$t_z > 1{,}5a$	Планетарное изображение звезды в виде бурлящего пятна.

При малой величине турбуленции ее измерения недостаточно точны. Данжон и Кудер поэтому считают выгоднее определять турбуленцию t''_z для различных зенитных расстояний Z, не слишком близких к зениту, и от найденных значений t_z переходить к t'' — турбуленции в зените.

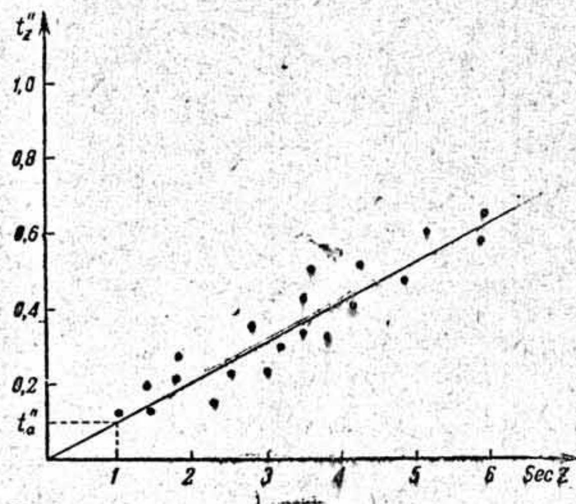


Рис. 3. График зависимости t'' от Sec Z.

В этом методе принимается, что толщина атмосферы, через которую проходит луч от звезды, увеличивается пропорционально Sec Z и величина угла турбуленции также пропорциональна Sec Z. Определив из наблюдений величину угла турбуленции t''_z, можно по ней определить и t''_0, т. е. величину угла турбуленции в зените. Для этого достаточно построить график зависимости t''_z от Sec Z (рис. 3), на котором точки отдельных наблюдений хорошо ложатся на прямую, проходящую через начало координат. На этой прямой берем точку с абсциссой, равной 1, т. е. при $Z=0$ ордината этой точки и определяет нам t''_0.

Оценка качества изображений в значительной степени зависит от диаметра объектива. С уменьшением диаметра отверстия трубы улучшается дифракционная картина, но

Рис. 4. Фотографический след звезды.

зато увеличивается мерцание. Метод Данжона — Кудера удобен тем, что диаметр объектива не имеет значения в окончательной оценке турбуленции.

Величина угла турбуленции подвержена большим изменениям от одного дня к другому и в разных местах колеблется по-разному. Когда изображения очень неспокойные, эта величина превосходит 1″ (для зенита); при очень спокойных, как говорят, отличных, изображениях она будет меньше 0″, 1.

Можно построить график зависимости величины качества изображений, выраженной в баллах шкалы Данжона — Кудера, от зенитного расстояния.

Дрожание звезд определяется фотографическим путем по наблюдениям следов звезд в фокусе неподвижного телескопа. В этом способе имеется существенный недостаток — дрожание самого телескопа, которое невозможно полностью исключить. Пользуясь этим способом, необходимо принимать некоторые предосторожности, проводить наблюдения при безветренной погоде, не открывать затвор фотографической камеры до тех пор, пока инструмент не успокоится, и не прикасаться к инструменту при фотографировании следа. Часовой механизм при этом должен быть остановлен. На рис. 4 изображен след звезды. Величина дрожания изображения звезды возрастает с увеличением зенитного расстояния.

Наблюдения мерцания звезд лучше всего производить электрофотометрически, т. е. с фотоэлементом или электронным умножителем при последующем усилении фототока. Изображение звезды, получаемое телескопом, фокусируется на щель электрофотометра, далее при помощи линзы оно проектируется на катод фотоумножителя. Изменения яркости света от звезды создают соответствующие изменения в токе фотоумножителя, сигналы которого после усиления поступают на экран осциллографа и фотографируются на пленку. На рис. 5 приведена электрофотометрическая запись мерцания звезды. Мерцание звезд также увеличивается с возрастанием зенитного расстояния.

Астроклимат и метеорология

Турбуленция воздуха возникает от неровного рельефа местности, от неравномерности нагревания отдельных частей земной поверхности, порывов ветра, от неоднородности в распределении влажности, от изменения плотности атмосферы и т. п. Поэтому астроклиматические характеристики должны также в значительной степени зависеть от географических и метеорологических условий.



Рис. 5. Электрофотометрическая запись мерцания звезды.

Как показали наблюдения, проводившиеся в экспедициях Главной астрономической обсерватории АН СССР в 1956—1957 годах, география района играет существенную роль в образовании атмосферных помех, портящих изображения звезд, а именно — ровный гладкий рельеф местности способствует образованию хороших изображений.

К такому же выводу пришли и бельгийские астрономы Кутр и Босси, проводившие исследования в южном полушарии, вблизи экватора в Бельгийском Конго в 1948 году. Они указывают, что рельеф местности является главной причиной турбуленции, а термический эффект (охлаждение нагретой днем почвы) имеет второстепенное значение.

К такому же заключению о влиянии рельефа пришел и автор настоящей книги, проводя изучения астроклимата в Казахстане в 1950 году с целью выбора места для постройки планетной обсерватории.

Наблюдения планет требуют исключительного спокойствия изображений, что зависит от разных причин, но главным образом от рельефа местности.

Большие, совершенно гладкие равнины, удаленные на значительные расстояния от гор, крупных водоемов и лесных массивов, представляются наиболее подходящими для наблюдения планет. Такими местами являются обширные степи или полупустыни, покрытые незначительной растительностью, которая способствует предохранению астрономических приборов от пыли. Одним словом, как говорил об этом наш знаменитый исследователь планет Г. А. Тихов, планетная обсерватория несовместима с хорошим пейзажем и приятными местами.

Но в этом вопросе еще много неясного, и о нем нет единого мнения. В дальнейших работах необходимо будет уточнить, как рельеф сказывается на качестве изображений и на турбуленции. Для этого необходимо провести одновременные экспедиции в местах с различным рельефом и с разными подстилающими поверхностями.

Поскольку качество изображений зависит от помех, происходящих в атмосфере, то казалось, что больше всего будут оказывать влияние на изображение звезд метеорологические элементы. Но выявить влияние какого-либо одного метеорологического элемента на качество изображения не всегда удается. Очевидно, вопрос осложняется тем, что влияние на качество изображений оказывает не один какой-либо метеорологический фактор, а целая группа факторов совместно.

К этому надо прибавить еще действие синоптических и географических факторов. Вот почему у некоторых авторов не получилось определенных зависимостей между элементами погоды и качеством изображения, тогда как другие исследователи отмечают связь качества изображений с состоянием погоды. Так, астроном Гарвардской обсерватории Бок (США) указывает, что особенно заметное ухудшение качества изображения наблюдается в ясные зимние ночи и обычно предшествует появлению слабого холодного ветра.

Сопоставление атмосферного давления, а также относительной влажности с величиной угла турбуленции в зените в Пулкове показало зависимость этих характеристик между собой, что дает нам основание сделать следующие существенные выводы из наших наблюдений:

с повышением давления атмосферы качество изображений улучшается и, следовательно, угол турбуленции в зените уменьшается;

с повышением относительной влажности качество изображения улучшается и, следовательно, угол турбуленции в зените уменьшается.

Подобные результаты получил немецкий астроном Шмейдлер в Мюнхене, наблюдая звезды при помощи вертикального круга в течение 10 лет — с 1940 по 1950 год. Он статистически исследовал зависимость условий наблюдения от состояния погоды. Оценивая качество изображений по 4-балльной шкале, Шмейдлер сделал ряд выводов. Наилучшее качество изображений звезд в Мюнхене оказалось осенью, худшее — весной. Благоприятно влияют на качество изображений высокое атмосферное давление, высокая относительная влажность и малая сила ветра. Другие метеорологические элементы заметного влияния не оказывают. Эти выводы находятся в полном согласии с нашими результатами.

Поскольку качество изображений, как показали наши исследования, зависит от географических условий ландшафта, то, следовательно, причины, влияющие на изменение изображения, должны быть в самом низком слое тропосферы.

Американский астроном Холл считает, что устойчивость изображения светила может быть внезапно нарушена в результате движения воздуха в низших слоях атмосферы. По его мнению, «моря» возмущенного воздуха, толщиной от нескольких сотен до нескольких тысяч метров, могут покрывать площади в сотни километров.

Другой американский астроном, Цвикки, считает, что в воздухе имеются некоторые области с плотностью, температурой и влажностью, отличными от соседних. Эти области он назвал «воздушными каплями». Оптические свойства таких капель отличны от оптических свойств окружающей среды. Такие капли, проходя перед объективом телескопа, действуют, как добавочные линзы, нарушают фокус системы и служат причиной порчи изображения в фокальной плоскости трубы.

По-видимому, ухудшение качества изображений связано с непостоянством температуры вблизи инструмента и с воздушными течениями, которые создаются вокруг него.

Это подтверждает и английский астроном Теккерей, производивший наблюдения в Радклиффской обсерватории в Претории (Южно-Африканская Республика). Его почти трехлетние наблюдения показали, что имеется зависимость между качеством изображений звезд и изменением температуры в башне за время наблюдений, а также изменением температуры и скорости ветра у поверхности Земли. При отсутствии ветра и при постоянстве температуры изображения были очень хорошими, тогда как при сильных ветрах ночью и при значительном изменении температуры изображения были плохими.

Мы не обнаружили связи дрожания с мерцанием изображений звезд. Такое отсутствие связи между этими характеристиками подтверждает и американский астроном Хосфельд, который считает, что смещение изображений и мерцание являются независимыми друг от друга характеристиками. Оба эти явления возникают на разных участках пути светового луча в атмосфере. Мерцание эффективно возникает выше, чем дрожание. Хосфельд сопоставляет движение изображений звезды Арктура с фотоэлектрической записью и показал, что между этими характеристиками нет ничего общего. Это также подтвердилось исследованием двойных звезд. Хосфельд пришел к выводу, что эффект смещения изображений связан с турбулентностью в непосредственной близости к объективу инструмента, в то время как мерцание обусловлено свободной атмосферой.

Очень важно определение слоев атмосферы, которые служат причиной дрожаний изображений звезд. Из наших наблюдений следует, что это — низкие слои тропосферы. Такой вывод подтверждается тем, что при запыленной или мглистой атмосфере изображения спокойнее; легкая пленка облаков

также успокаивает изображения. Следовательно, воздушные «линзы», нарушающие правильный ход луча, находятся где-то ниже.

Американские исследователи Гиффорд, Джонсон и Вильсон считают, что дрожание изображений вызывается атмосферными слоями, расположенными на высотах порядка 100 *м*. Директор французской обсерватории Пик дю Миди Рёш специально рассмотрел этот вопрос и пришел к заключению, что на качество изображений влияют температурный режим в трубе инструмента, устройство купола башни, орография местности и состояние атмосферы. Далее он показал, что близкие неоднородности изменяют резкость изображения, не влияя на его яркость. Отдельные неоднородности вызывают колебания яркости (мерцание) и деформируют изображение, не изменяя его резкости.

С декабря 1955 года в ряде районов Южно-Африканской Республики производилось изучение астроклимата с целью выбора места для постройки астрономической обсерватории. Наблюдения проводились при помощи четырех зеркальных телескопов с диаметрами отверстий 20 *см*, снабженных фотоэлектрическими фотометрами. Оценка качества изображений производилась методом Данжона — Кудера. Были отобраны только районы с максимальным числом безоблачных ночей. Из наблюдений следовало, что мерцание звезд на различных станциях практически было одинаковым, в то время как качество изображений было совершенно разным.

Немецкий исследователь Поцдена говорит о том, что дрожание изображений, при ослаблении которого качество изображений улучшается, очень зависит от состояния погоды. Главной силой, заставляющей воздушные массы перемещаться, является изменение атмосферного давления.

Большой интерес представляет вопрос о зависимости астроклиматических характеристик от синоптических воздушных масс. Воздушные массы, как известно, делятся на устойчивые, или тепловые, и неустойчивые, или холодные. Устойчивая воздушная масса отличается от неустойчивой отсутствием в ней восходящих воздушных токов, и конвекция развивается в ней тем хуже, чем меньше изменяется с высотой температура.

На устойчивость воздушной массы влияет более низкая температура подстилающей поверхности по сравнению с воздухом. Благодаря этому изменение температуры с высотой уменьшается. Когда подстилающая поверхность, на которой движется воздушная масса, более теплая, чем воздух самой массы, и поэтому в ней происходит перемешивание воздуха, то масса становится неустойчивой.

В неустойчивых воздушных массах размывание, а также дрожание изображений должно быть значительно больше, чем в устойчивых. Такую зависимость качества изображений звезд

от воздушных масс обнаружила научная сотрудница Казахской АН В. С. Соколова в горном районе Алма-Аты.

Уже давно было замечено, что мерцание звезд сильнее зимой, чем летом, а вместе с ним зимой усиливается и хроматическое мерцание. Из наблюдений получалось, что величина мерцания связана с количеством водяных паров в атмосфере: чем их больше, тем звезды мерцают сильнее. Перед приближением циклона мерцание усиливается. Об этом говорит и народная примета: «Перед дождем звезды сильно мерцают».

Наблюдения бельгийского ученого Монтиньи также подтверждают это: мерцание звезд увеличивается при приближении дождя, а после его окончания уменьшается. Мерцание усиливается с понижением атмосферного давления и с понижением температуры, а также при увеличении скорости ветра, но только до известного предела.

Но при очень сильном ветре мерцание делается слабее. Оно становится уже заметным при величине угла турбуленции, равным 0",2. Особый интерес представляет вопрос о связи метеорологических факторов с хроматическим мерцанием звезд, например о зависимости порядка смены цветов мерцающей звезды от направления ветра. Для иллюстрации сказанного о зависимости интенсивности мерцания от температуры приведем следующие данные:

Средняя температура (в градусах)	21,3	17,5	11,3	7,0	3,1	—4,0	—7,7
Интенсивность мерцания	39	44	55	60	75	99	103

Исследования Монтиньи показывают, что интенсивность мерцания находится в прямой зависимости от гигрометрического состояния воздуха; она увеличивается при приближении дождя.

	Интенсивность мерцания			
	Весна	Лето	Осень	Зима
При ясной погоде	58	44	59	71
Перед дождем	78	68	82	103

Сильное мерцание звезд указывает, что атмосфера неоднородна, что слои воздуха различной плотности в ней перемещены.

Французскими исследователями Дюфуром и Бигарденом и немецким геофизиком Дором было замечено, что мерцание увеличивается при низком атмосферном давлении, низкой температуре, большой влажности, больших искривлениях изобар [1] и при большом изменении давления с высотой. Отмечено, что

[1] Изобары — линии, соединяющие точки с одинаковой величиной атмосферного давления.

наиболее сильное мерцание при ветре средней силы. Но все эти зависимости настолько переплетены между собой, что в настоящее время невозможно использовать явление мерцания звезд для предсказания погоды.

Интересно, что в Антарктиде нет мерцания звезд и качество изображений хорошее (Батлер, Холл).

Изучения астроклимата, выполненные за последнее время, показывают, что закономерности в изменении качества изображений в разных местах не найдены. Иногда наблюдается сильное различие качества изображения в районах, находящихся друг от друга на небольшом расстоянии. Анализ наблюдательного материала, полученного астрономическими обсерваториями США, и высотные наблюдения турбуленции атмосферы позволяют сделать вывод, что толщина турбулентного слоя воздуха колеблется от 90 до 1500 *м*, а его протяженность может быть от 20 до 200 *км*. Поэтому вполне возможно, что качество изображений звезд зависит от изменения положения этих значительных масс воздуха.

Все найденные общие связи между астроклиматическими характеристиками, с одной стороны, и географическими и метеорологическими условиями — с другой, еще недостаточно уточнены: имеется очень много противоречивых результатов.

Необходимо продолжать исследования и установить более определенные зависимости между указанными явлениями.

Изучение астроклимата в СССР

Советский Союз представляет собой самое обширное материковое пространство нашей планеты. Для большинства мест Земли морской климат является нормальным. Совершенно бесспорно, что самые значительные отклонения от нормального климата встречаются в пределах СССР. Именно у нас, в районе Алтая, находится «полюс континентальности».

Благодаря большому разнообразию географических ландшафтов на территории СССР имеется много и различных климатов. Нет никаких сомнений, что и астроклимат различных районов СССР будет иметь большое различие. Многие практические вопросы, выдвинутые жизнью за последнее время, требовали изучения астроклиматических характеристик, не говоря уже о важности исследования астроклимата для астрономии.

Для изучения астроклимата СССР Пулковская обсерватория проводит экспедиции с целью наблюдения астроклиматических характеристик. Такие экспедиции пока проводились в южных районах Союза, где в ближайшие годы будут строиться новые обсерватории и солнечные станции. Охвачена территория Союза от 38 до 45° северной широты, начиная от

Азовского моря до Тихого океана. Предварительно был изучен климатический материал этих районов. На основании полученных данных и учитывая географические условия, были выбраны пункты для работы экспедиций. Наблюдения проводились в течение многих месяцев на зеркальных линзовых телескопах типа АЗТ-7 с диаметром отверстия 20 *см* (рис. 6).

В некоторые периоды работали отдельные экспедиции, тогда как в другие периоды работало одновременно большое число экспедиций (до 16).



Рис. 6. Зеркально-линзовый телескоп АЗТ-7.

Были обследованы: Анапа на берегу Черного моря, станицы Суворовская, Отрада Кубанская и Зеленчукская Ставропольского края, Горная солнечная станция Пулковской обсерватории в районе Кисловодска, селение Вихли и горы Турчидаг в Дагестане, селения Цихиджвари и Атоци в Грузии, Дара в Армении, Байрам-Али в Туркмении, горы Санглок и Искандер-Куль в Таджикистане, урочище Чечекты на Памире. Чимган в Узбекистане, перевал Тюз-Ашу, Тюл и Джети-Огуз в районе озера Иссык-Куль в Тянь-Шане, Уссурийск, Сучан и Турий Рог на Дальнем Востоке.

В результате проведенных работ получен огромный наблюдательный материал, который выявил места с наилучшими астроклиматическими характеристиками. Такими местами оказались: урочище Чечекты на Памире, Альпийские луга в районе Джети Огуз в отрогах главного хребта Тянь-Шаня, Терская Алатау, берега озера Искандер-Куль и гора Санглок в Таджикистане, Анапа на берегу Черного моря, горные вершины в районе Зеленчукской станицы Ставропольского края и Горная солнечная станция в районе Кисловодска.

На рис. 7 приведен сводный график наблюдений средней величины угла турбуленции в зените в течение 3 месяцев 1960 года для наблюдательного пункта на горе Санглок в южной части Таджикистана и наблюдательного пункта в Байрам-Али — оазис в пустыне Кара-Кум, недалеко от города Мары.

Значение t''_0 для дней, отдаленных от других дней наблюдений, представлено на графике изолированными точками, а в

тех случаях, когда наблюдательные дни идут один за другим, точки соединяются линиями.

На графике хорошо видна разница в качестве изображения звезд на двух указанных пунктах. На горе Санглок гораздо лучше изображения, т. е. атмосфера более спокойная, чем в Байрам-Али. Объяснить это можно тем, что Санглок—сравнительно высокое место, и, следовательно, значительная часть турбулентного слоя расположена ниже этого пункта, тогда как

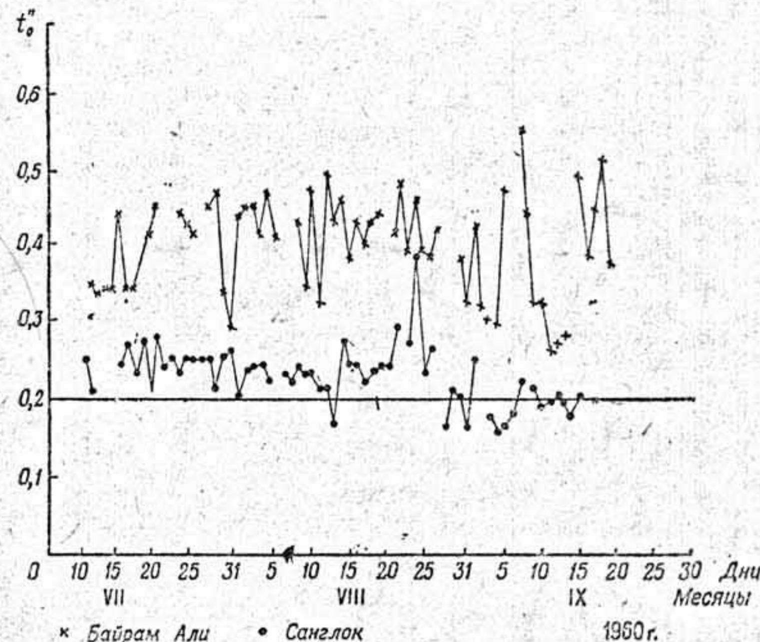


Рис. 7. Сводный график изменения угла турбуленции для двух пунктов.

Байрам-Али находится на самом дне воздушного океана и все помехи, возникшие в нем, приходятся на этот пункт.

В таблице 1 приведены для сравнения 8 пунктов, в которых производилось исследование астроклимата.

Из данных этой таблицы можно сделать следующие выводы: наибольшее число ясных ночей (свыше 80%) имеют пункты, расположенные в Таджикистане и на Памире (1, 2 и 4). Однако наибольшее число ночей с отличными изображениями (свыше 40%) имеют Чапал и Семь родников в районе Зеленчукской станицы на Северном Кавказе и урочище Чечекты на Памире.

Таким образом, некоторые из приведенных в таблице стан-

ций являются очень хорошими в смысле спокойствия звездных изображений, и их можно рекомендовать в качестве мест для строительства будущих астрономических обсерваторий.

Таблица I

	Станции	Период наблюдений (в днях)	Количество наблюдательных ночей	Процент наблюдательных ночей	Количество отличных изображений	Процент отличных изображений
1	Чечекты (Памир)	336 (с 12/XI 1959 г. по 13/X 1960 г.) . . .	277	82,4	129	46,5
2	Санглок	68 (с 10/VII 1960 г. по 15/IX 1960 г.) . .	60	83,2	11	17,3
3	Джети-Огуз	105 (с 5/VII 1960 г. по 17/X 1960 г.) . . .	44	48,4	7	8,7
4	Искандер-Куль	75 (с 6/VIII 1960 г. по 20/X 1960 г.) . .	75	100	24	31,6
5	Горная станция ГАО	1366 (с 15/VIII 1957 г. по 30/VIII 1960 г.) . .	603	44,2	157	25,8
6	Семь родников	128 (с 10/II 1961 г. по 15/IX 1961 г.) . .	77	59,8	37	48,1
7	Чапал	126 (с 25/V 1961 г. по 28/IX 1961 г.) . .	76	59,8	40	52,6
8	Анапа	643 (с 17/VIII 1954 г. по 17/VII 1958 г.) . .	335	52,1	42	12,5

Где строить астрономические обсерватории

Астрономия — наука о космосе — в настоящий момент одна из животрепещущих областей человеческого знания. В решении астрономических проблем все больше будут использоваться современные технические средства, в том числе и применяемые в астронавтике.

Космические ракеты — настоящие разведчики астрономии, своеобразные щупальца, протянутые к небесным объектам.

Но всех задач астрономии ракеты, конечно, решить не смогут, и поэтому роль классических наблюдений астрономии остается по-прежнему весьма важной. Да и наблюдения за полетом самих ракет требуют тех же астрономических наблюдений.

Вот почему в ближайшее время в СССР должны быть построены новые астрономические обсерватории разного профиля, которые будут решать, помимо общих астрономических проблем, и специальные, более узкие задачи, например планетной астрономии, солнечной короны и т. п.

В нашей стране недостаточно астрономических обсерваторий. Распределение астрономических обсерваторий на территории нашего Союза также не удовлетворяет современным требованиям. Многие из этих обсерваторий возникли случайно. В основном наиболее крупные астрономические обсерватории сосредоточены в Европейской части Советского Союза. Несколько сравнительно больших обсерваторий имеется в Средней Азии.

Полностью они отсутствуют в Сибири. Даже малых обсерваторий университетского типа в Сибири почти не имеется, за исключением обсерваторий Томского и Иркутского университетов и трех специальных станций.

Многие наблюдательные задачи требуют равномерного распределения астрономических обсерваторий по долготе, с тем чтобы наблюдения какого-либо объекта могли продолжаться непрерывно. Когда на одной обсерватории наблюдения прекращаются из-за погружения этого объекта под горизонт, тогда обсерватории, расположенные к западу, могут продолжать эти наблюдения.

Круглосуточные наблюдения особенно важны для службы Солнца, для наблюдений Марса и других планет, для наблюдений космических ракет и спутников.

Отсутствие же астрономических обсерваторий на таком огромном пространстве, как Сибирь, прерывает наблюдения, начиная с японских обсерваторий до Алма-Аты, а если в Японии в момент наблюдения было пасмурно, то разрыв получается еще больше: наблюдения прерываются начиная от Соединенных Штатов до Алма-Аты. Такой длительный перерыв в наблюдениях, доходящий до половины суток, не дает возможности проследить за каким-нибудь процессом, происходящим на Солнце.

Из сказанного ясно, какое важное значение имеет для современной астрономии постройка астрономических обсерваторий в Сибири.

Все астрономические обсерватории, которые строили до сих пор, располагались в местах, далеко не лучших по условиям наблюдения. На Земле нет таких мест, где атмосфера была бы всегда в спокойном состоянии. Стабильность атмосферы может иметь временный характер.

Вопрос о выборе места для постройки астрономической обсерватории труден, так как никаких выработанных рецептов, условий или закономерностей на этот счет не имеется. До сих пор далеко не ясно, в какой местности надо строить обсерватории: на высокой горе или в равнинном месте, вблизи или вдали от моря, в лесу, в степи или в пустыне.

Хотя вообще в горных районах качество изображений обычно посредственное, на обсерватории Пик дю Миди в Пи-

ринеях изображения часто бывают отличными, что приписывается изолированному положению вершины горы. Поэтому для исследования планет эта обсерватория одна из лучших в мире.

Где будут лучше изображения звезд, зависящие от спокойствия атмосферы, сказать еще трудно, и единого мнения по этому вопросу не существует. Поэтому каждый раз, когда доходит дело до постройки обсерватории, начинают искать место, руководствуясь при этом сначала климатическими характеристиками. Наметив, таким образом, подходящие места, направляют туда наблюдательные экспедиции, которые обычно работают на каждом из пунктов недолго. Затем, сравнивая результаты наблюдений неспокойствия изображения звезд, производят окончательный выбор места.

Но какие существуют гарантии, что выбранное место действительно подходящее? Устойчиво ли для него спокойствие атмосферы, сказать невозможно, так как длительных наблюдений не производилось и, кроме того, неизвестно, от каких параметров зависит спокойствие атмосферы и не претерпевает ли оно изменения с течением времени.

При выборе места для астрономических наблюдений прежде всего интересуются количеством ясных дней в году и средней скоростью ветра.

Первым этапом работ по выбору места будущей обсерватории должно быть климатическое ознакомление с теми областями страны, где желательно построить обсерваторию (например, по соображениям, связанным с широтой места, удобством путей сообщения, близостью научных центров и т. п.). Для этого можно выбрать несколько десятков метеорологических станций, находящихся в указанных областях, и построить для каждой из этих станций графики средних месячных величин скорости ветра, облачности, числа ясных и пасмурных дней за месяц, влажности и температуры. По этим графикам можно выбрать районы с оптимальными условиями: сравнительно большое количество ясных дней, минимальная влажность и скорость ветра.

В намеченных районах необходимо провести рекогносцировочные поездки с легким переносным телескопом для выбора пунктов, в которых можно было бы установить одинаковые телескопы с диаметром объектива порядка 15—20 *см*. Ввиду того, что в любом месте бывают ночи как с хорошими, так и с плохими изображениями, необходимо обосноваться в этих пунктах для систематического изучения астроклиматических характеристик на длительное время — от одного года до трех лет, в зависимости от результатов наблюдений первого года.

Если первый год покажет на какой-либо станции хорошие результаты, т. е. астроклиматические условия благоприятны,

то имеет смысл продолжать наблюдения еще один или два года.

Если же для большей части наблюдаемого времени будут отрицательные результаты, то можно эту наблюдательную станцию перенести в другой пункт того же района, но только с иным микроклиматом или в другой район.

Пункт для проведения астроклиматических наблюдений должен иметь открытый горизонт или, по крайней мере, достаточно большой обзор по всем направлениям. Закрытость горизонта не должна превышать 10° в южных азимутах и не более 15° в северных.

Наблюдательная площадка должна быть достаточно большой и ровной, без оврагов и ущелий. Вблизи телескопа не должно быть построек и деревьев. Кроме того, площадка должна быть сухая, и желательно, чтобы она хотя бы немного возвышалась над окружающей местностью.

Если телескоп небольших размеров и легкий по весу, то его после наблюдений уносят с наблюдательной площадки. Если же инструмент больших размеров и смонтирован на колонне, то его лучше всего установить на каменном основании в павильоне с открывающейся крышей.

Программа наблюдений

Для полной характеристики астроклимата данного места необходимо исследовать его характеристики круглосуточно в течение длительного времени. Практически рекомендуется наблюдать в три срока ночью: вечером, после окончания сумерек, в полночь и под утро и три раза днем: утром, после восхода солнца, в полдень и вечером, перед заходом солнца.

Ночные наблюдения состоят в оценке степени размытости дифракционного изображения звезд, дрожания и мерцания. Ночные наблюдения начинаются через 1—1½ часа после захода солнца визуальным обзором всего неба. Оценка производится в четырех азимутах (север, юг, запад и восток), по 5—6 звезд в каждом, на разных зенитных расстояниях. Степень размытости дифракционных изображений звезд определяется по пятибалльной шкале Данжона — Кудера (см. приложение 1). При этом очень важно установить те зенитные расстояния, на которых происходит переход оценок от одного балла к другому, например, с «5» до «4», с «4» до «3» и т. д.

Перед началом наблюдений необходимо тщательно отфокусировать телескоп по какой-либо яркой звезде. При правильной фокусировке в центре дифракционного изображения звезды должен быть светлый кружок. Если же в центре получается темное пятнышко, то это значит, что фокус не найден

и его нужно продолжать искать до тех пор, пока в центре не будет светлый кружок.

В журнале наблюдений записывается дата, время начала и конца наблюдений в данном азимуте, оценка степени размытости изображений каждой звезды в баллах по шкале Данжона — Кудера, причем можно добавить и дробные числа, например, 2,5, 3,5 и т. д., в тех случаях, когда трудно решить, к какому целому значению балла можно отнести данное изображение. Далее записывают зенитное расстояние звезды в градусах, отсчитываемое по зенитомеру, прикладываемому к трубе или установленному на ней.

Удобнее всего наводить телескоп на звезду, поймав ее предварительно в искатель. Найдя ее в поле зрения искателя, выводят звезду при помощи микрометрических винтов в центр поля зрения, затем рассматривают ее в главную трубу через окуляр с большим увеличением и дают оценку в баллах.

Но любителям астрономии сплошь и рядом приходится наблюдать в телескопы, не имеющие часовых механизмов. В таком случае для оценки степени размытости изображения звезды ее ставят при помощи микрометрических винтов на самый край поля и затем наблюдают ее прохождение через поле зрения, стараясь оценить в баллах ее дифракционную картину.

Если наблюдатель не успел произвести оценку, звезду снова возвращают на край поля и снова наблюдают ее. При этом к телескопу не следует прикасаться, чтобы не вызвать колебания трубы.

По окончании обзора всего неба переходят к наблюдению дрожаний, которые производятся при условии неподвижности инструмента, т. е. при отсутствии ветра. Существует несколько методов определения дрожания звезд. Наиболее простой— метод наблюдения Полярной звезды при помощи окуляр-микроскопа с увеличением от 500 до 700 раз, в фокусе которого натянуты три нити на расстоянии, равном примерно диаметру ложного диска звезды (центрального светлого дифракционного кружка). Оценка производится по дрожанию края ложного диска в долях расстояния между нитями в течение 10 секунд.

Гораздо более точный метод определения величины дрожания звезд — фотографический. Наводя телескоп на звезду, наблюдатель открывает кассету. Затем при помощи микрометрического ключа телескопа выводит звезду из поля зрения и ожидает некоторое время, давая возможность инструменту успокоиться, остановив при этом часовой механизм, и наконец открывает затвор несколько ранее того момента, когда звезда вследствие суточного вращения небесного свода войдет в поле зрения телескопа.

Рассчитав, сколько времени нужно звезде, чтобы пройти

поле зрения, закрывают затвор. На фотопластинке звезда вычерчивает свой след, обычно волнистый. Далее телескоп наводится на другую звезду на другом зенитном расстоянии и на этой же пластинке снимает ее след рядом с предыдущим и т. д., пока не будет получен полный «разрез» неба от горизонта до зенита со следами 5—6 звезд. Удобнее всего это делать в меридиане в направлении на юг.

После наблюдения дрожаний определяют величину мерцания звезд либо визуальным методом, пользуясь пятибалльной шкалой (см. приложение 4), либо при помощи специального электрофотометра.

В качестве дополнительного наблюдательного материала, характеризующего качество изображения при наличии Луны или Юпитера на небе в момент наблюдения, можно произвести оценку края и деталей этих объектов, используя для этого специальные шкалы (см. приложения 2 и 3).

Для наблюдения прозрачности атмосферы, не преследуя точности, можно применить очень простой способ. Приготовив при помощи кальки звездную карту околополярной области по атласу А. А. Михайлова со звездами до 7,5 величины, наблюдатель каждую ночь в срок наблюдения отмечает, до какой величины видны звезды невооруженным глазом и в бинокль.

Дневные наблюдения начинаются через 1—1½ часа после восхода солнца определением дрожания края солнечного диска, применяя для этого сильный окуляр с сеткой и делениями. Условие неподвижности телескопа сохраняется по-прежнему. Кроме того, можно на экране наблюдать и оценивать изображения различных образований на Солнце (грануляции, пятна, факелы).

После этого определяют яркость неба, которая зависит от запыленной атмосферы. Для этого достаточно определить яркость и протяженность околосолнечного ореола, пользуясь при этом глазомерными оценками по шкале Тихова (см. приложение 5) и выражая протяженность в радиусах Солнца.

Для более полной характеристики состояния дневного неба можно оценивать его цвет по шкале Тихова (см. приложение 5). Цикл проведенных наблюдений повторяют в полдень и вечером за 1½ часа до захода солнца. При каждом наблюдении необходимо указывать высоту солнца над горизонтом.

Кроме того, днем и ночью должны вестись метеорологические наблюдения, состоящие в определении: облачности (характер и количество), направлении и скорости ветра, относительной влажности, температуры и давления атмосферы.

Такую полную программу наблюдения удается выдержи-

вать лишь при условии совершенно ясной и безветренной погоды. Появление облаков, тумана или ветра нарушает выполнение программы, ее приходится тогда менять, приспосабливаясь к метеорологическим условиям.

Обработка наблюдений

Для каждого срока наблюдения по всем пунктам строятся кривые изменения оценок степени размытости дифракционного изображения в зависимости от зенитного расстояния. Сопоставление таких графиков от ночи к ночи, а также для разных пунктов представляет большой интерес и сразу же показывает значительную разницу между наблюдательными станциями. На этих же графиках можно отметить и метеорологические данные, полученные в срок астрономических наблюдений.

Для объективного сравнения наблюдений звездных изображений их необходимо привести в одну систему, установив личную разность наблюдателей и свойства инструментов. Для этого необходимо определить личную разность между наблюдателями на одном и том же инструменте. Это нужно сделать при подготовке наблюдателей перед отправкой их в экспедицию.

Крайне желательно произвести и сравнение инструментов между собой. Для этого несколько наблюдателей последовательно наблюдают одни и те же звезды на всех имеющихся инструментах.

После приведения всех наблюдений в одну систему можно строить для каждого места наблюдения средние кривые по месяцам за каждый срок наблюдений.

Кроме того, необходимо построить график для каждого пункта за один какой-нибудь срок для всего периода наблюдений.

Обработку наблюдений дрожания изображения можно провести следующим образом. Строится график изменения средней квадратической величины дрожания, выраженной в секундах дуги, в зависимости от зенитного расстояния для каждого дня по срокам наблюдения.

Обработка наблюдений прозрачности ночной атмосферы заключается в построении графика изменения предельной звездной величины для каждой ночи наблюдения. Аналогично обрабатываются и данные наблюдения дрожания диска Солнца и яркости неба.

На основании тщательного анализа всех полученных графиков и сопоставления их друг с другом можно сделать вывод о преимуществе одного из наблюдательных пунктов для постройки обсерватории.

241—57

* * *

В настоящее время изучение астроклимата привлекает внимание все большего круга советских специалистов, и в этой важной области уже получены весьма интересные результаты.

Необходимость в исследовании астроклимата в век космических полетов не снижается, а возрастает в связи с постройкой новых обсерваторий, ведущих наблюдения за очень удаленными звездными системами. В таких обсерваториях устанавливаются мощные телескопы.

Кроме того, изучение астроклимата представляется все более важным и для развития других областей современной науки.

Приложение 1

Шкала Данжона — Кудера

Балл	Характеристика дифракционного изображения
1	Совершенное дифракционное изображение без ощутимой деформации слегка может быть волнующимся.
2	Неразорванные дифракционные кольца с пробегающими по ним сгустками света.
3	Изображение заметно волнуется, кольца местами разорваны, края дифракционного кружка волнуются.
4	Сильное волнение изображения: дифракционные кольца исчезают; пятно выбрасывает из себя пучок лучей, тотчас же исчезающих.
5	Изображение в виде бурлящего диффузного пятна, относительно устойчивой формы, усеянного мелкими волнующимися блестками. Если бы не это бурление, изображение звезды походило бы на диск планеты.

Приложение 2

Шкала качества лунных изображений

Балл	Качества лунного края и деталей
1	Край лунного диска совершенно спокоен и резко очерчен. Детали на краю видны отлично.
2	Край лунного диска спокоен, но слегка размыт. Детали на краю видны.
3	Край лунного диска колеблется и размыт. Детали на краю плохо видны.
4	Край лунного диска сильно колеблется, струится и переливается. Детали на краю диска едва различаются.
5	Край лунного диска чрезвычайно сильно колеблется, струится и переливается. Детали на краю не различаются.

241—57

Приложение 3

Шкала качества изображения Юпитера

Балл	Качества диска и деталей Юпитера
1	Диск Юпитера совершенно спокоен и резко очерчен. Детали на диске прекрасно видны. Различается семь полос.
2	Диск Юпитера спокоен. Детали видны хорошо. Различается шесть полос.
3	Диск Юпитера колеблется и размыт. Детали видны. Различается пять полос.
4	Диск Юпитера сильно дрожит. Детали видны плохо. Различается четыре полосы.
5	Диск Юпитера чрезвычайно сильно дрожит. Детали едва видны. Различается три полосы.

Приложение 4

Балл	Характеристика мерцания
1	Звезда не мерцает.
2	Звезда едва мерцает.
3	Звезда заметно мерцает.
4	Звезда мерцает.
5	Звезда сильно мерцает.

Приложение 5

Шкала Тихова

Балл	Характеристика ореола
0	Ореола не видно, небо сапфирное до самого Солнца.
1	Ореол очень слаб, так что небо около Солнца имеет еще голубоватый цвет.
2	Ореол уничтожает голубоватый цвет неба около Солнца, но он еще не чисто белый, а имеет стальной оттенок.
3	Ореол молочно-белый.
4	Ореол ярко-белый.
5	Ореол очень яркий (золотистый).

Шкала Тихова

Балл	Характеристика неба
0	Небо темное, глубоко-синее, иногда с фиолетовым оттенком.
1	Небо сине-голубое.
2	Небо голубое.
3	Небо светло-голубое (белесоватое).
4	Небо сильно белесоватое, иногда со слабым желтым или бурым оттенком.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
От автора	3
Атмосфера Земли и ее свойства	4
Астроклимат и его характеристика	10
Астроклимат и метеорология	20
Изучение астроклимата в СССР	25
Где строить астрономические обсерватории	28
Программа наблюдений	31
Обработка наблюдений	34
Приложения	36

Автор
Николай Иванович Кучеров

Редактор И. Б. Файнбойм
Худож. редактор Р. А. Варшамов
Техн. редактор И. Т. Ракитин
Корректор Н. М. Краспопольская
Обложка художника И. Кравцова

Сдано в набор 25.VII—62 г. Подп. к печати 25.VIII—62 г. Изд. № 306.
Формат бум. 60×92$^{1}/_{16}$ Бум. л. 1,25 Печ. л. 2,5 Уч.-изд. л. 2,21
А 07295 Цена 8 коп. Тираж 29000 экз. Заказ 2459.
Издательство «Знание». Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4.

Типография изд-ва «Знание». Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4.